

超高倍率ズームレンズの設計

伊藤 大介

Optical Design of the High-Power Zoom Lens

Daisuke ITO

We have developed a high-power zoom lens for PowerShot SX30IS, which is the Canon compact digital camera with 35× zoom ratio lens ($f = 4.3\text{--}150.5/F 2.7\text{--}5.8$). This taking lens attains a compact size by PNP zoom type. And the taking lens attains the high resolution by a material of “Hi Index Ultra Low Dispersion”, which we call “Hi-UD lens”.

Key words: Hi-UD lens, PNP zoom type

1. 高倍率ズームレンズのトレンドと技術課題

1.1 高倍率ズームレンズのトレンド

近年のズームレンズは、年々高倍率化が加速している。ズーム倍率が高くなろうとも、レンズに要求される光学性能やカメラの大型化が許されるわけではなく、“小型・高倍率”がトレンドとなっている。

ズームレンズは複数のレンズ群を相対移動することにより焦点距離を変化させる構造となっており、従来より、負の第1レンズ群、正の第2レンズ群、正の第3レンズ群の3つのレンズ群より構成されるズームタイプがコンパクトカメラに用いられてきた。ただしこのズームタイプ(図1)は、ズーム倍率を稼ぐには限界があった。

高倍率化を実現するために、この3群構成のズームレンズの最も物体側に正レンズを配置させ、ズーミング時に移動させることで高倍率化を狙ったものが、各社より製品化されている。例えば図2のように、正の第1レンズ群、負の第2レンズ群、正の第3レンズ群、正の第4レンズ群より構成されるズームレンズである。

さらに、ズーミングにおける移動量の短縮や高性能化を図るために、4群以上のレンズ群を用いてズームレンズを構成する多群構成へと進化している(図3)。この多群構成のズームレンズにおいて、コンパクト化を実現するために、沈胴時にレンズを退避させる退避構造や、光線を途中で折り曲げる光学系(図4)なども製品化されており、高

倍率でありながら、コンパクト化の競争が激化している。

高倍率ズームレンズは、大きく分けて2つのタイプに分類できる。高倍率を重視し、しっかりとカメラを持って撮影できるグリップタイプと、携帯性を重視し、電源オフ時にレンズ部がカメラの厚み方向に収納され、持ち運びが楽なコンパクトタイプである。

その中で、キヤノンではコンパクトデジタルカメラの高倍率ズームレンズとして、2009年にグリップタイプの20倍ズームレンズ(奥行き方向厚み86.9mm)を発売した。このカメラ以降、2010年にはズーム倍率35倍(厚み107.7mm)、2012年にはズーム倍率50倍(厚み105.5mm)と、グリップタイプは高倍率化の進化を遂げている。また、上述のグリップタイプの20倍ズームレンズに対して、奥行き方向の厚みを薄くしつつも高倍率化を達成したグリップタイプの30倍ズームレンズ(厚み80.2mm)や、ズーム倍率を維持しつつも薄型化を実現したコンパクトタイプの20倍ズームレンズ(厚み32.7mm)も発売されている。

このように、近年、ズームレンズは、20倍を超えるようなズーム倍率であっても、携帯性を重視するか、ズーム倍率を重視するかなどの目的に応じて、選択可能な製品群が充実してきている(図5)。

1.2 技術課題

定性的にズームレンズの高倍率化を行うためには、ズーミングにおけるレンズ群の移動量を大きくすることや、レ

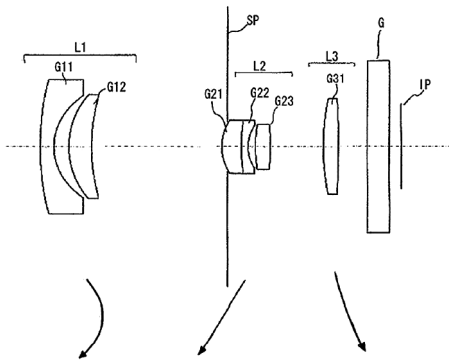


図1 負正正構成。(特許第 4759632 号)

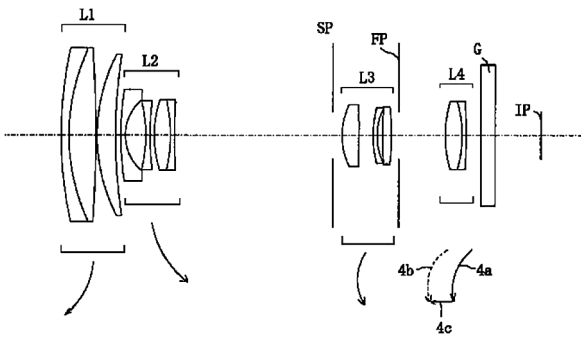


図2 正負正正構成。(特許第 5171986 号)

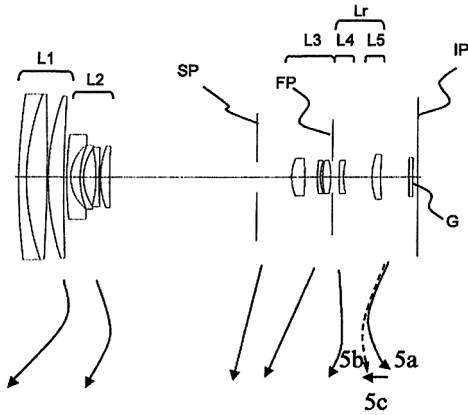


図3 多群構成。(特開 2010-276655)

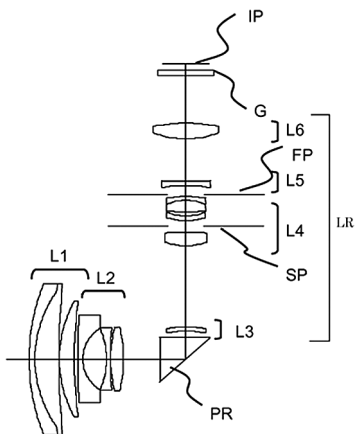


図4 屈曲多群構成。(特開 2012-27084)

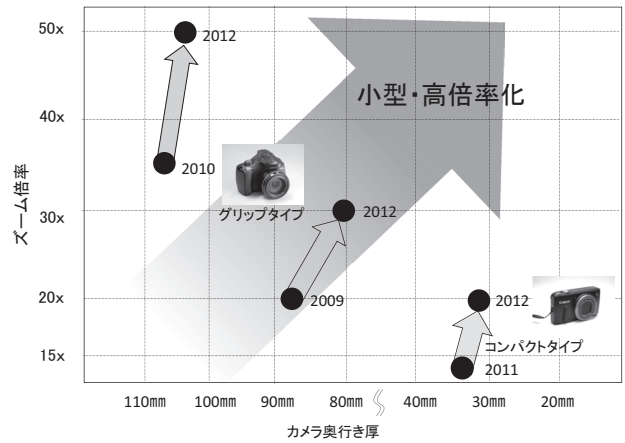


図5 高倍率ズームレンズのトレンド。



図6 35倍ズームレンズ搭載のデジタルカメラ。

レンズ群の屈折力を強めることが必要となるが、単純に構造を変更するだけでは、カメラの大型化や性能の低下を招くことになる。小型化と高性能化を両立させるためには、適切な屈折力配置や適切なガラス材料の選択が重要になる。特に、高倍率化によって望遠端では軸上色収差が発生しやすく、軸上色収差を抑えつつも小型化を達成することが大きな技術課題といえる。すなわち、高倍率化におけるおもな課題点は「レンズ系全体の小型化」と「望遠端における色収差の低減」の2点である。

2. 具体的設計事例

上記の技術課題を克服した代表的な事例として、2010年に発売された35倍ズームレンズについて説明する。35倍ズームレンズは、銀塩換算焦点距離にて広角端24mmから望遠端840mmの画角をカバーし、幅広いユーザーの需要に応えるモデルとなっている。「光学35倍/高性能」を達成するために、コンパクトデジタルカメラとしては初となるHi-UDレンズ(hi index ultra low dispersion)を採用し、さらに、UDレンズ(ultra low dispersion)と組み

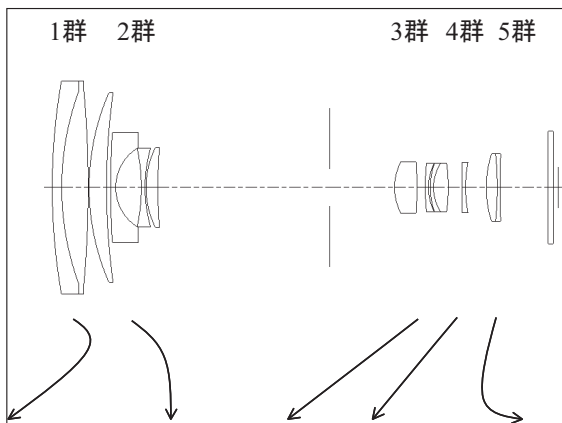


図7 35倍ズームレンズの断面図。

合わせることで、望遠端 840 mm にて発生する色収差を低減しつつ、1400 万画素 CCD に対応した高い光学性能を実現した (図 6)。

2.1 レンズ系全体の小型化

図7に35倍ズームレンズの断面図を示す。また表1に、前機種となる20倍ズームレンズとの仕様の比較を示す。35倍ズームレンズでは、レンズ系全体を小型化するために、正の第1レンズ群、負の第2レンズ群、正の第3レンズ群、負の第4レンズ群、正の第5レンズ群の5群構成とした。また、ズーミングに際し、全群を移動させる構成とした。さらに、第3レンズ群を光軸と垂直に移動させることによりシフト防振を行い、第5レンズ群を光軸方向に移動させることによりフォーカシングを行う構成とした。この構成により、35倍ズームレンズは小型化を狙いつつも、前機種20倍ズームレンズの銀塩換算焦点距離 28 mm ~ 560 mm の仕様に対して、広角端側へも望遠側へも撮影領域の拡大を狙った。

高倍率系のズームタイプとしては正負正正の4群構成のズームタイプがよく知られているが、35倍ズームレンズでは正負正負正の5群構成のズームタイプを採用することにより、レンズに関して、具体的には「前玉径の小型化」「フォーカス移動量の短縮」「シフト群移動量の短縮」を狙った。

2.2 望遠端における色収差の低減

35倍ズームレンズでは、望遠端焦点距離を 840 mm へと望遠化したことにより、軸上色収差の発生が著しくなる。そのため、第1レンズ群の正レンズの硝材、第3レンズ群の硝材を工夫することにより、軸上色収差の低減を狙った。第1レンズ群にはHi-UDレンズを、第3レンズ群には低分散硝材を採用している。

表1 35倍と20倍ズームレンズのスペック比較。

	35倍ズーム	20倍ズーム
CCD	1/2.3	1/2.3
画素数	1400万画素	1200万画素
焦点距離(W)	4.3 mm	5.0 mm
焦点距離(T)	150.5 mm	100.0 mm
銀塩換算(W)	24 mm	28 mm
銀塩換算(T)	840 mm	560 mm
開放F値(W)	2.7	2.8
開放F値(T)	5.8	5.7
光学ズーム倍率	35倍	20倍
撮影距離(W) マクロ	0 cm	0 cm
撮影距離(T) 至近	1.4 m	1.0 m

3. 結 果

3.1 レンズ系全体の小型化

3.1.1 前玉径の小型化

35倍ズームレンズでは、第1レンズ群がレンズ系の中で最も大きなレンズ径を有する。つまり第1レンズ群径の大きさがレンズ鏡筒の径を決めるため、第1レンズ群が大きいとカメラの大きさに影響する。また、第1レンズ群は移動群であるため、重量が軽いことが必要である。よって、第1レンズ群のレンズ構成は大きさと性能を考慮し、正正正の3枚にて構成した。

35倍ズームレンズは第2レンズ群と第3レンズ群の間に絞りを配置しており、絞りより像面側に負の第4レンズ群を配置したことにより、第1レンズ群の前玉径を小型化している。35倍ズームレンズの第1レンズの物体側有効径は広角端の軸外光線下線にて決まり、第2レンズ、第3レンズの有効径は望遠側の軸外光線下線にて決まっている。第2レンズと第3レンズの有効径が大きくなると、加工上の制約によりレンズ肉厚を厚くしなければならず、レンズ厚が厚くなると第1レンズの物体側の面は絞りから離れるため、前玉径が大きくなる。そのため、レンズ肉厚を薄くするためにも、望遠側にて第2レンズ、第3レンズの有効径を決めている軸外光線下線を抑えることが重要となる。

ここで、5群構成のズームタイプの第4レンズ群の効果を確認するために、正負正正の4群構成のズームタイプを作成し、比較を行った。作成の前提条件としては、5群構成のズームレンズと第1レンズ群の焦点距離、第2レンズ群の焦点距離を完全に一致させ、広角端、望遠端での焦点距離、広角端、望遠端における第3レンズ群以降の後群の合成焦点距離、第1レンズ群第2レンズ群間隔、絞りと第2レンズ群、第3レンズ群間隔をほぼ同等とした。正負正負正の5群構成のズームタイプと正負正正の4群構成のズームタイプを比較すると、2 mm 程度の小型化を実現できた。

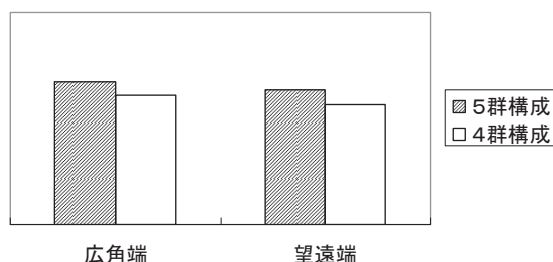


図8 フォーカスレンズ群の位置敏感度比較.

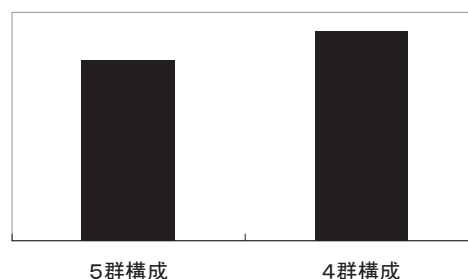


図9 フォーカス繰り出し量比較.

3.1.2 フォーカス移動量の短縮

35倍ズームレンズでは、正の第5レンズ群にてフォーカシングを行う、いわゆるリアフォーカス方式を採用している。この構成にて問題となるのが、無限から至近へのフォーカシングによる第5レンズ群の移動量である。移動量が増えると、光軸方向に大型化してしまう。特に望遠端ではフォーカシングによる移動量が大きくなるため、限られたスペース内にてフォーカシングを行う必要がある。フォーカス移動量を短縮するには、フォーカスレンズ群のフォーカス敏感度（位置敏感度＝フォーカスレンズの移動量と、それに伴うバックフォーカスの変化量との比）を高くすることが必要となる。正負正負正の5群構成ズームタイプは、位置敏感度を大きくすることに有利なパワー配置をしている。フォーカスレンズ群の焦点距離を f 、バックフォーカスを Sk 、フォーカスレンズ群の横倍率を β_f としたとき、以下の関係がある。

$$Sk = (1 - \beta_f) \cdot f$$

ここで、35倍ズームレンズにおいて、3.1.1項「前玉径の小型化」にて述べた正負正正の4群構成ズームタイプと、5群構成ズームタイプのフォーカスレンズ群の焦点距離を比較する。5群構成ズームタイプと4群構成ズームタイプは、第3レンズ群以降の合成焦点距離が同じになるように設定しているため、負の第4レンズ群を配置している35倍ズームレンズのほうがフォーカスレンズ群の焦点距離が短くなる。また、上記2つのズームレンズにおいて、フォーカスレンズ群の焦点距離はバックフォーカスよりも長くなっており、 $0 < Sk/f < 1$ となる。5群構成ズームタイプと4群構成ズームレンズのバックフォーカスを同等とすれば、 Sk/f の値は f 値の小さい5群構成ズームタイプのほうが大きくなる。結果として、最終レンズ群の β_f の値は、5群構成ズームタイプのほうが小さい値をとる。

また、フォーカスレンズ群の位置敏感度は、フォーカスレンズ群の β_f と以下の関係がある。

$$\text{フォーカスレンズ群の位置敏感度} = (1 - \beta_f^2)$$

5群構成ズームタイプは4群構成ズームタイプと比較し

てフォーカスレンズ群の β_f が小さくなるため、5群構成ズームタイプのフォーカスレンズ群の位置敏感度は高くなり、フォーカシング移動量を短縮することが可能となる。5群構成ズームタイプと4群構成ズームタイプにおけるフォーカスレンズ群の位置敏感度を図8に、望遠端におけるフォーカス繰り出し量を図9に示す。

以上のように、5群構成ズームタイプでは、フォーカスレンズ群の位置敏感度を大きくし、フォーカス移動量を短縮したことにより、望遠端焦点距離 840 mm にて、前玉より 1.4 m までの至近のフォーカシングを可能にしている。至近距離 1.4 m は 20倍ズームレンズの望遠端の至近距離 1.0 m と撮影倍率は同等である。

3.1.3 シフト群移動量の短縮

35倍ズームレンズでは、正の第3レンズ群にて光軸と垂直方向にシフト防振を行う構成としている。この構成にて問題となるのがシフト群移動量である。シフト群移動量が大きくなると、光学性能や、鏡筒の大きさに影響してしまう。ここで、レンズ系の焦点距離を f 、シフト群移動敏感度（シフト群の移動量とそれに伴う像面変動量の比）を TS としたとき、シフト群移動量は以下のように表せる。

$$\text{シフト群移動量} = f \cdot \tan(\text{補正角度}) / TS$$

35倍ズームレンズは望遠端の焦点距離が長いため、シフト群移動量を小さくするためには TS を大きくすることが必要となる。また、シフト群移動敏感度 TS は、シフト群の横倍率を β_{IS} 、シフト群よりも像側のレンズ群の横倍率を β_R とすると、以下のように表せる。

$$TS = (1 - \beta_{IS}) \cdot \beta_R$$

35倍ズームレンズでは β_R を大きくすることによりシフト群移動敏感度を大きくした。3.1.1項「前玉径の小型化」にて述べた4群構成ズームタイプと5群構成ズームタイプのシフトレンズ群の焦点距離を比較する。5群構成ズームタイプと4群構成ズームタイプは第3レンズ群以降の合成焦点距離が同じになるように設定されているため、負の第4レンズ群を配置している5群構成ズームタイプのほうがシフトレンズ群の焦点距離が短くなる。これによ

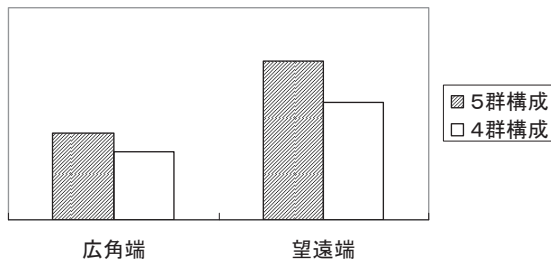


図10 シフトレンズ群のシフト移動敏感度比較.

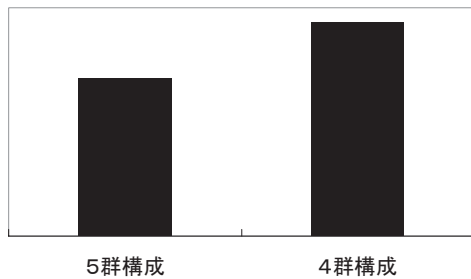


図11 望遠端におけるシフト群移動量比較.

り、シフトレンズ群とシフトレンズ群の像点位置までの距離は、5群構成ズームタイプのほうが4群構成ズームレンズよりも短くなる。結果として、シフト群よりも像側の群の横倍率 β_R を大きくすることができる。5群構成ズームタイプと4群構成ズームタイプにおけるシフトレンズ群のシフト群移動敏感度を図10に、望遠端におけるシフト群移動量を図11に示す。

以上のように、35倍ズームレンズでは、シフト群移動敏感度を大きくし、シフト群移動量を短縮したことにより、径方向の大きさの小型化を可能にした。

このように、35倍ズームレンズでは正負正負正の5群構成ズームタイプにすることにより上述の効果を、レンズ系全体を小型化している。

3.2 望遠端における色収差の低減

3.2.1 第1レンズ群にHi-UDレンズ採用

第1レンズ群にて発生する軸上色収差は後群の縦倍率(横倍率 β の2乗)により拡大されるため、第1レンズ群にて補正が重要になる。レンズ全系の焦点距離を f 、第2レンズ群からの後群の横倍率を β 、第1レンズ群の焦点距離を f_1 としたとき、以下の関係にある。

$$f = f_1 \cdot \beta$$

35倍ズームレンズの望遠端では20倍ズームレンズよりも長焦点化しており、望遠端における後群の横倍率 β は20倍ズームレンズと比較して約1.17倍となる。縦倍率(β の2乗)に換算すると1.37倍にもなり、軸上色収差が拡大される。

そこで、35倍ズームレンズでは、この軸上色収差を低

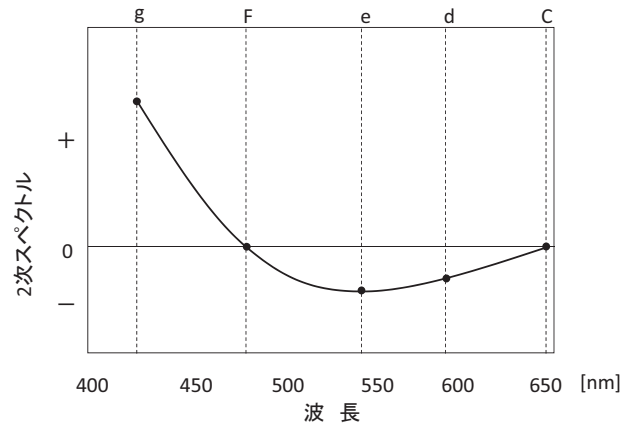


図12 二次スペクトル.

減するために、第1レンズ群内の正レンズ1枚に、コンパクトデジタルカメラとしては初となるHi-UDレンズを採用した。Hi-UDレンズは低分散領域にて高い屈折率と異常分散性を合わせもつ硝材である。また、もう一方の正レンズにはUDレンズを採用し、Hi-UDレンズとUDレンズの組み合わせにより軸上色収差を低減した。

軸上色収差とは各波長の結像点のずれを指すが、一般に、低分散の正レンズと高分散の負レンズとを組み合わせることにより、2色の波長の結像点を合致させることができる。例えば、赤色領域と緑色領域の2点の結像点を合致することができる。これを色消しとよぶが、色消しは2つの波長に対して行われるので、その他の波長、例えば青色領域の結像点は、赤色領域と緑色領域の結像点とはずれ、このずれを二次スペクトルとよぶ。高倍率ズームレンズでは望遠端にて二次スペクトルが大きく発生するため、これを補正することが重要となる。

図12に、低分散の正レンズと高分散の負レンズの組み合わせにより、F線とC線の色消しをした場合の二次スペクトルのイメージ図を示す。F線とC線ではゼロ、その中間波長では負、短波長側と長波長側では正の二次スペクトルとなる。

青色領域の結像点のずれを補正するには、青色領域、すなわち短波長領域の屈折率が、他の波長領域の屈折率に対して相対的に大きい低分散材料を正レンズに用いるとよい。

Hi-UDレンズとUDレンズはこのような特性をもつ材料であり、短波長側から長波長側まで、可視域の結像点のずれを良好に補正することができる。

図13に、望遠端における軸上色収差の二次スペクトルの比較を示す。①は35倍ズームレンズの曲線、②は35倍ズームレンズにてHi-UDレンズの異常分散性を通常ガラスと同等とした曲線(d線の屈折率とアッペ数を変えずに θ_{gF} グラフのノーマルライン上に一致させた)、③は35倍

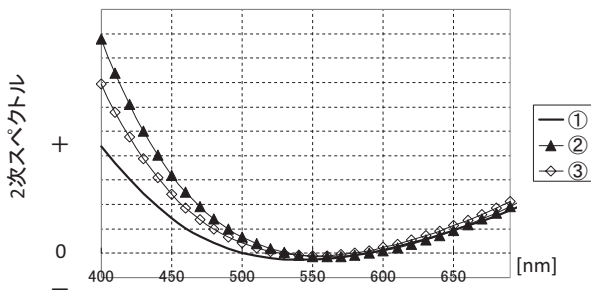


図13 第1レンズ群にHi-UDを使用したときの望遠端の軸上色収差.

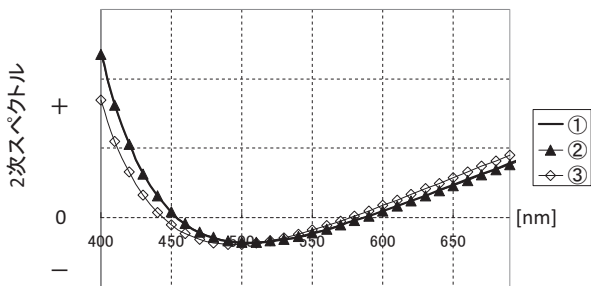


図14 第1レンズ群にHi-UDを使用したときの広角端の倍率色収差.

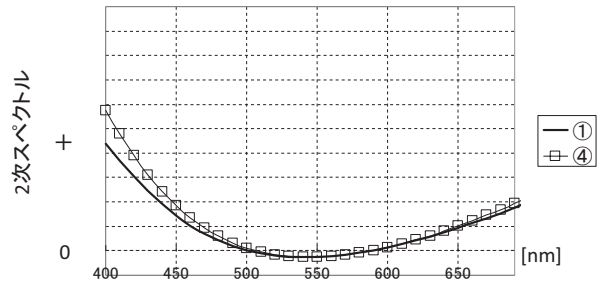


図15 第3レンズ群に低分散材を使用したときの望遠端の軸上色収差.

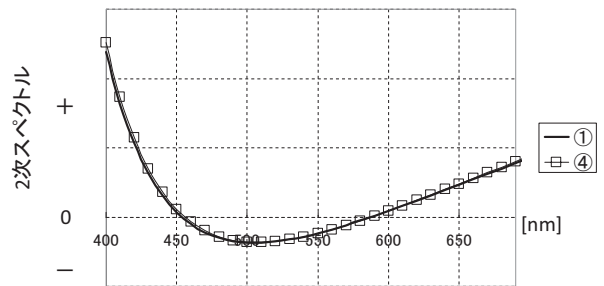


図16 第3レンズ群に低分散材を使用したときの広角端の倍率色収差.

ズームレンズにて20倍ズームレンズと同等のガラス材料を使用した曲線を示す。また、図14に、広角端における倍率色収差の二次スペクトルの比較を示す。①②③は望遠端と同じものである。

Hi-UDレンズの採用により、望遠端での軸上色収差の二次スペクトルを大きく低減できていることがわかる。一方、広角端での倍率色収差の二次スペクトルは若干大きくなるが、35倍ズームレンズでは広角端から望遠端まで良好に補正できている。

また、Hi-UDレンズは低分散領域にてUDレンズよりも高い屈折率を有しているため、第1レンズ群内の第3レンズにUDレンズと同等の屈折率のレンズを使用した場合よりも、第3レンズの肉厚を薄くすることが可能になる。第3レンズの肉厚が薄くなると絞りから最物体側面までの距離が近くなるため、第2レンズの肉厚も薄くすることが可能となる。

3.2.2 第3レンズ群に低分散硝材採用

35倍ズームレンズでは、第1レンズ群以外にも望遠端の軸上色収差を低減するように工夫されている。第3レンズ群の最物体側の正レンズに低分散硝材を採用することにより、軸上色収差の二次スペクトルを低減した。

図15に望遠端における軸上色収差の二次スペクトルの比較を示す。①は35倍ズームレンズの曲線、④は35倍ズームレンズにて第3レンズ群の最物体側正レンズの異常

分散性を通常ガラスと同等とした曲線（d線の屈折率とアッペ数を変えずに θ_{gF} グラフのノーマルライン上に一致させた）である。また、図16に広角端における倍率色収差の二次スペクトルの比較を示す。①④は望遠端と同じものである。低分散材料を採用したことで、軸上色収差の二次スペクトルを低減した。

以上のように、35倍ズームレンズでは、第1レンズ群の硝材と第3レンズ群の硝材を工夫することにより、望遠端における色収差が低減している。

以上に述べたように、35倍ズームレンズでは正負正負正の5群ズームタイプを採用することにより、広角端24mmから望遠端840mmのスペックに対して小型化を実現した。また、Hi-UDレンズを使用することで、840mmの望遠端で発生する色収差を低減した。

高倍率ズームレンズは今後もさらなる進化が予想される。市場が望む新しいレンズが生み出せるよう、今後も新規レンズを探索していきたいと考えている。

文 献

- 1) 辻 定彦：レンズ設計のすべて（電波新聞社，2006）pp. 131-144.
- 2) 早水良定：光機器の光学I（日本オプトメカトロニクス協会，2003）pp. 403-408.

（2013年2月8日受理）